



University of Groningen

De relatieve aanslagkans der L-niveau's in het röntgenspectrum

van Zuylen, Jacob

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

1932

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

van Zuylen, J. (1932). De relatieve aanslagkans der L-niveau's in het röntgenspectrum. Groningen: Koninklijke Van Gorcum.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

I. INLEIDING.

Voor de frequentie ν van een door een atoom uitgezonden spectraallijn geldt de frequentie-voorwaarde van BOHR

$$h\nu = E' - E''.$$

Hierin is h de constante van PLANCK, E' de energie van het atoom in den begintoestand, E'' die in den eindtoestand. De in het normale Röntgenspectrum optredende energie-niveau's zijn de energieën van een atoom, waaruit een electron uit een der inwendige electronen-groepen of -„schillen” ontbreekt. Deze schillen worden van binnen naar buiten K-, L-, M-, enz. schil genoemd. De orde van grootte van de frequentie wordt door de energie van het beginniveau bepaald. Al naarmate dit een K-, L-, of M-niveau is, krijgt men een K-, L- of M-spectrum. Zoo wordt bijv. de $K\alpha$ -lijn uitgezonden, indien aanvankelijk een electron uit de K-groep ontbreekt en dan een electron uit de L-groep in de K-groep overgaat; in den eindtoestand ontbreekt dan een electron uit de L-groep. Het is mogelijk gebleken, de energie-niveau's in het Röntgenspectrum door 3 quantum-getallen n , l , en j te karakteriseeren; hierbij is $n = 1$ voor het K-niveau, $n = 2$ voor de L-niveau's enz. Dat dit mogelijk is, hangt hiermede samen, dat de kernlading op de werking der overige electronen overweegt, en dat men den invloed der overige electronen in eerste benadering als een „schermwerking” op de kernlading in rekening kan brengen. Het experiment leert nu, dat er bij de zwaardere elementen één K-, drie L-, vijf M-niveau's, enz. zijn. Deze veelvuldigheid kan men met behulp van de reciprociteits-stelling van PAULI begrijpen. Een volledige electronengroep is impulsloos. Indien er nu uit zoo'n volledige groep één electron verwijderd wordt, krijgt men met betrekking tot de impulsen (baanimpuls en electronen-spin) dezelfde mogelijkheden als in het optische alkalispectrum, waar behalve impulslooze electronen-groepen in het atoom één optisch electron aan de peripherie aan-

wezig is. Indien nu, zooals in het binnenste van de zwaardere atomen het geval is, de kernlading op de werking van de overige electronen-groepen ver overweegt, krijgen we voor deze binnenste electronen het zoogenaamde koppelingsgeval B: de baanimpuls l van een electron wordt met zijn electronenspin $\frac{1}{2}$ gekoppeld tot een totaal impuls-moment voor dit electron $j = l \pm \frac{1}{2}$. We kunnen in dit geval elk electron niet alleen een n en l , maar ook zijn eigen j toeschrijven; er zijn dan evenveel ondergroepen van electronen als er energie-niveau's in het Röntgengebied zijn; de ondergroepen en de energie-niveau's worden door dezelfde quantumgetallen n, l, j gekarakteriseerd ¹⁾. Voor de L-groep bestaan er, zooals boven werd opgemerkt, 3 onder-niveau's.

Bij het koppelingsgeval B bestaan er dus ook 3 ondergroepen van electronen, die we, wanneer het geen verwarring kan wekken door dezelfde symbolen zullen karakteriseren. Deze L-onderniveau's, tegelijkertijd ondergroepen van electronen, zijn:

L_I	$n = 2$	$l = 0$	$j = \frac{1}{2}$	(2 electronen)
L_{II}	$n = 2$	$l = 1$	$j = \frac{1}{2}$	(2 electronen)
L_{III}	$n = 2$	$l = 1$	$j = 1\frac{1}{2}$	(4 electronen)

Er zijn twee mogelijkheden om een electron van een inwendig energieniveau te verwijderen: botsing met een materieel deeltje (electron) van voldoende hoge energie of absorptie van straling met voldoende hoge frequentie.

Een experimenteel onderzoek van de ionisatie-processen kan op verschillende wijzen worden uitgevoerd. Men kan metingen verrichten aan de vrijgekomen electronen of aan de straling, die geëmitteerd wordt. De eerste methode is alleen uitvoerbaar, wanneer de ionisatie door straling wordt opgewekt. Om electronen uit ondergroepen met hetzelfde hoofdquantumgetal van elkaar te kunnen onderscheiden, is het noodig van de electronen met een magnetisch veld een spectrum te ontwerpen. Electronen uit verschillende

¹⁾ Dit geldt natuurlijk alleen, indien het koppelingsgeval B aanwezig is. Indien men dit in het midden wil laten, kan men de ondergroepen van electronen alleen door n en l karakteriseren. Dit wordt ook gewoonlijk gedaan.

schalen kunnen ook met een Wilsoncamera onderscheiden worden.

De belangrijkste resultaten, verkregen met de methode van de magnetische β -straal-spectroscopie betreffen de richtingsverdeling van de foto-electronen en de relatieve kans op ionisatie van niveau's met hetzelfde hoofdquantumgetal. In beide gevallen blijkt het gedrag van de electronen voor een zeer belangrijk gedeelte door het azimuthale-quantumgetal l bepaald te worden, terwijl beide componenten van een spin-doublet (bijv. L_{II} en L_{III}) geen uitgesproken verschil in gedrag vertoonen.

Onderzoekingen over de richtingsverdeling van de foto-electronen zijn verricht door WATSON en v. D. AKKER ¹⁾. Zij bestraalden zeer dunne folies van verschillende materialen met de karakteristieke straling van zilver of molybdeen. Van de electronen, die onder een bepaalden hoek met de richting van de primaire bundel het preparaat verlieten, werden magnetische spectra opgenomen. Het bleek, dat steeds de electronen van de L_{II} - en L_{III} -niveau's veel meer isotroop verdeeld waren, dan die uit de K- en L_I -niveau's. Deze laatste hebben hun maximale intensiteit onder een hoek van 80° met de voorwaartsche richting van de opvallende bundel, terwijl onder hoeken van 0° en 180° practisch geen electronen van deze soort werden uitgeworpen. Bij de electronen uit L_{II} en L_{III} was dit wel het geval, terwijl het maximum ligt bij een hoek, belangrijk kleiner dan 80° . Quantitatieve intensiteitsmetingen werden niet verricht. Bij de M-schil werden analoge resultaten verkregen.

Over de relatieve ionisatiekans van niveau's met hetzelfde hoofdquantumgetal zijn verschillende onderzoekingen verricht. Het meest volledig zijn de onderzoekingen van ROBINSON ²⁾ waarbij de methode der β -straal-spectroscopie werd toegepast. Uit dit werk blijkt dat de verhouding

- | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-----|-----|------|
| 1) E. C. WATSON and J. A. v. D. AKKER | Proc. Roy. Soc. | 126 | 138 | 1929 |
| 2) H. R. ROBINSON and W. E. RAWLINSON | Phil. Mag. | 28 | 277 | 1914 |
| H. R. ROBINSON | Proc. Roy. Soc. | 104 | 455 | 1923 |
| H. R. ROBINSON | Phil. Mag. | 50 | 241 | 1925 |
| H. R. ROBINSON and A. M. CASSIE | Proc. Roy. Soc. | 113 | 282 | 1926 |
| H. R. ROBINSON and U. YOUNG | Proc. Roy. Soc. | 128 | 92 | 1930 |

van de kans op ionisatie bij verschillende niveau's op verschillende wijze afhankelijk is van de opvallende frequentie. Ook hier zijn geen quantitative intensiteitsmetingen verricht; de intensiteiten werden geschat volgens een visuele schaal (1—6). Bij eenzelfde element werden geen metingen verricht met meer dan drie verschillende frequenties, maar het beeld wordt op waardevolle wijze gecompleteerd, doordat bij eenzelfde frequentie meerdere elementen werden onderzocht. Het blijkt, dat niveau's met kleine l t.o.v. die met grotere l relatief sterker worden met toenemende frequentie van de ioniserende straling. Wanneer de frequentie niet veel groter is, dan nodig voor ionisatie, zijn L_I , L_{II} en L_{III} in opklimmende volgorde sterker. Bij zeer hoge frequentie daarentegen is L_I zeer veel sterker dan de beide andere. Een analoog verloop is bij de M-niveau's waargenomen. De moeilijkheid, deze methode te gebruiken voor quantitative intensiteitsmetingen, is voor een groot gedeelte gelegen in het feit, dat de electronen voor het verlaten van het preparaat, geremd worden. Daardoor hebben de meeste electronen, die van een bepaald niveau afkomstig zijn, kleinere snelheden dan de maximale. Het magnetische spectrum bestaat derhalve uit banden, die aan de kant van groote snelheden scherp begrensd zijn, naar kleinere snelheden langzaam in intensiteit afnemen. Uit een dergelijke band fotometrisch intensiteiten te bepalen, brengt groote moeilijkheden mee. Een zeer groot voordeel van de methode is gelegen in de mogelijkheid, uit de snelheid van het electron te zien op welke wijze het atoom, waaruit het afkomstig is, werd geïoniseerd. Hierdoor is men in veel hoogere mate onafhankelijk van secundaire processen, dan bij andere methoden.

De onderzoekingen van ROBINSON zijn niet de oudste, die over dit onderwerp verricht zijn. Het eerst is men op het genoemde gedrag van niveau's met verschillende l opmerkzaam geworden door het onderzoek van de secundaire β -stralen van radioactieve stoffen. Deze ontstaan doordat γ -straling, geëmitteerd door de kern van een atoom, in de electronenwolk van hetzelfde atoom geabsorbeerd wordt, en zijn surplus aan energie afgeeft aan het vrijgemaakte electron. Men merkte op, dat de relatieve inten-

siteit van deze β -stralen geheel verschild van die, welke men berekenen kon uit de (door absorptieproeven bekende) ionisatiekansen voor straling in de buurt van de absorptiekanten. Men kan het zeer aannemelijk maken, dat voor de „inwendige” absorptie van γ -stralen andere wetten gelden, dan voor de normale absorptie van Röntgenstralen, speciaal in het gebied van de hardere γ -stralen ¹⁾. We willen dus verder de resultaten van deze onderzoeken buiten beschouwing laten. Wel willen we hier nog vermelden een onderzoek van SKINNER ²⁾, die intensiteiten heeft vergeleken van de lijnen, uitgezonden door door straling van verschillende golflengten geïoniseerde cerium-atomen. Er werden slechts ruwe schattingen met een fotometer verricht, maar toch konden duidelijk intensiteitsveranderingen worden waargenomen. Vergeleken werden de lijnen β_2 (N_V-L_{III}) en β_3 (M_{III}-L_I) van cerium. Bij een primaire straling, weinig harder dan voor ionisatie nodig was, was de intensiteits-verhouding $\beta_2 : \beta_3$ ongeveer 2 : 1. Bij straling, die ongeveer driemaal harder was, waren beide lijnen ongeveer even intensief. Over het gedrag van L_{II} ten opzichte van L_{III} waren geen conclusies te maken. SKINNER wijst er op, dat het noodzakelijk is, een speciale aanname te maken, om uit intensiteitsmetingen van de geëmitteerde straling de relatieve ionisatiekansen van de beginniveaus te bepalen. Deze aanname is, dat de waarschijnlijkheid van de elektronenovergangen, die de lijnen veroorzaken, niet merkbaar door de verschillende uitwendige omstandigheden wordt beïnvloed. De grootste kans op afwijkingen bestaat daarin, dat „gestimuleerde emissie” zal optreden, dus dat de overgangswaarschijnlijkheid groter zal worden, doordat reeds straling van de te emitteren soort aanwezig is. Het effect blijkt echter te klein te zijn, zoodat het steeds verwaarloosd kan worden. Een controle-middel heeft men bij dit soort experimenten in de intensiteitsverhouding van lijnen met hetzelfde eindniveau. Deze hangt alleen van de overgangswaarschijnlijkheden af en mag dus niet veranderen, wanneer de lijnen op verschillende

¹⁾ G. GAMOW. Der Bau des Atomkerns und die Radioaktivität S. 96 (S. HIRZEL, Leipzig, 1932).

²⁾ H. W. B. SKINNER Proc. Camb. Phil. Soc. 22 379 1924

wijzen opgewekt worden. Het meest bekende voorbeeld is het $K\alpha$ doublet, dat zeer vaak gemeten is en waarvoor steeds de intensiteitsverhouding 1 : 2 gevonden wordt.

Onderzoekingen betreffende de ionisatie door botsing met electronen zijn steeds geschied door metingen aan de geëmitteerde straling. Doel van het onderzoek was gewoonlijk na te gaan, hoeveel ionen in totaal gevormd worden door een electron, dat met bekende snelheid in het te onderzoeken materiaal dringt (geïntegreerde aanslagfunctie). Hiertoe is het noodzakelijk in absolute maat de straling te meten, die in totaal door het te onderzoeken niveau wordt geëmitteerd. Men is dus aangewezen op niveau's met betrekkelijk weinig lijnen, waarvan de intensiteitsverhoudingen goed bekend, of gemakkelijk te meten zijn. Dientengevolge zijn de metingen steeds verricht aan het K-niveau ¹⁾. Het schijnt niet goed mogelijk, om ook bij andere niveau's dergelijke metingen te verrichten. Een groote moeilijkheid is bij deze onderzoekingen, dat de geëmitteerde straling als maat aangenomen wordt voor het totaal aantal gevormde ionen, en men dus secundaire processen apart in rekening moet brengen. In dit verband het belangrijkste is wel, dat een groot aantal ionen gevormd wordt door absorptie van de door remming van de electronen gevormde continue straling. Een tweede oorzaak van onzekerheid is, dat een deel der straling in het anti-kathodemateriaal zelf geabsorbeerd wordt. Men moet de invloed van de hier genoemde effecten apart meten of in rekening brengen. De aan te brengen correcties zijn van dezelfde orde van grootte als de te meten grootte en geschieden gedeeltelijk op grond van theoretisch slecht gefundeerde aannamen. Uit het voorgaande volgt, dat op de aangegeven wijze niet gemeten wordt, wat men gewoonlijk de aanslagfunctie noemt, d.i. de wijze waarop de kans, dat een electron in een atoom een bepaald niveau zal ioniseeren, afhangt van zijn snelheid. Zelfs als de kathodestralen oorspronkelijk alle dezelfde snelheid hebben, is het aantal rechtstreeks door botsing gevormde ionen toch geen maat

¹⁾ F. WISSHAK Ann. der Phys. 5 507 1930

(hierin ook opgave van oudere litteratuur).

voor deze kans, want het grootste aantal wordt gevormd door electronen, die door remming al een deel van hun snelheid hebben verloren.

In zeer veel gunstiger condities is men, wanneer men de relatieve ionisatiekans van verschillende niveau's vergelijken wil. Men kan hier een methode toepassen, om de invloed van de secundaire effecten te verkleinen, die het eerst door WEBSTER ¹⁾ is aangegeven. Men brengt de te onderzoeken stof in een zeer dunne laag op een blokje beryllium. De electronen gaan dan voor het grootste deel met een slechts gering snelheidsverlies door de stof heen en worden daarna in het beryllium geremd. De daardoor gevormde continue straling is veel minder intensief, dan die, welke in een massief stuk van de beschouwde stof onder gelijke omstandigheden gevormd zou worden. In het te onderzoeken element zal dus ook veel minder fluorescentiestraling opgewekt worden, dan anders geschieden zou. Een moeilijk in rekening te brengen complicatie ontstaat uit het feit, dat een deel van de electronen, na een langere of kortere weg in het beryllium te hebben afgelegd, weer in de buitenste laag zal terugkeeren en tot ionisatie aanleiding zal geven. Voor absolute metingen is deze methode niet geschikt, vooral omdat de dikte van de laag niet nauwkeurig te meten is. Bovendien is de intensiteit van de straling uit een dunne laag natuurlijk klein, waardoor absolute metingen ook bemoeilijkt worden. Voor relatieve metingen kan men de intensiteiten fotografisch vergelijken, waarbij de geringe intensiteit geen zeer groot bezwaar is. Van groot belang is hier, dat de straling nu voor het grootste deel afkomstig is van ionen, gevormd door electronen met bekende snelheid. De aanslagfunctie wordt hier dus niet geïntegreerd.

We hebben de methode toegepast, om de relatieve kans op ionisatie van de L-niveau's van wolfraam, bij verschillende spanningen te meten. De omstandigheden zijn hier zeer gunstig voor het verkrijgen van een bevredigend resultaat. Wolfraam is ook in dunne lagen weinig veranderlijk, zoodat men niet al te bang hoeft te zijn om met

¹⁾ D. L. WEBSTER: H. CLARK, R. M. YEATMAN and W. W. HANSEN,
Proc. Nat. Acad. Amer. 14 679 1928.

matige energie te werken. De lijnen van het L-spectrum van wolfram liggen in een gemakkelijk te bereiken golflengtegebied. Doordat de aanslagspanning van de L-niveau's tamelijk hoog is, werkt men met electronen van tamelijk groote energie, waardoor de te gebruiken laag wolfram niet overmatig dun hoeft te zijn.

De lijnen, die voor de metingen in aanmerking komen, zijn, gerangschikt naar toenemende golflengte:

β_2	N _V - L _{III}	1242	X-E.
β_3	M _{III} - L _I	1260	X-E.
β_1	M _{IV} - L _{II}	1279	X-E.
β_6	N _I - L _{III}	1287	X-E.
β_4	M _{II} - L _I	1299	X-E.

Onder de condities, die bij ons vervuld waren, kan men met massieve antikathode, bij een spanning van 40 kV en een stroom van 4 mA al deze lijnen met behoorlijke intensiteit in 10 minuten fotografeeren. Bij de „dunne” antikathode waren de belichtingstijden meestal ongeveer 6 uur (met ongeveer dezelfde energie).

Op de details van het experiment komen we later uitvoeriger terug. We willen hier eerst nagaan of het mogelijk is, theoretisch resultaten te voorspellen. Verreweg de meeste theoretische onderzoekingen zijn verricht over de ionisatie door absorptie van straling¹⁾. Hierbij heeft men de electronenspin steeds verwaarloosd, zoodat alleen electronen met verschillende l onderscheiden worden en er geen verschil gemaakt kan worden tusschen bijv. de L_{II}- en L_{III}-electronen. De berekeningen stemmen niet steeds volledig overeen, maar geven toch wel resultaten, die in overeenstemming zijn met de experimenten van ROBINSON. Ook de richtingsverdeling wordt gevonden in overeenstemming met de resultaten van WATSON en V. D. AKKER.

Over de ionisatie door electronenstoot is veel minder bekend. Het meest volledig krijgt men een overzicht uit

¹⁾ A. SOMMERFELD und G. SCHUR Ann. der Phys. 4 409 1930
 G. SCHUR Ann. der Phys. 4 433 1930
 M. STOBBE Ann. der Phys. 7 661 1931

een artikel van BETHE. ¹⁾ De gebruikte benaderingsmethode (stoottheorie van BORN) convergeert alleen voor zeer groote electronensnelheden. Er wordt gevonden, dat de ionisatiekansen evenredig is met:

$$\frac{1}{TE} \log \frac{4T}{E'}$$

T is de energie van het opvallende electron, E de ionisatie-energie, E' een energie, die weinig van de ionisatie-energie verschilt. De evenredigheidsfactor hangt nog af van de quantumgetallen van het electron, maar niet van T. Uit de formule zou volgen, dat de verhouding van de ionisatiekansen van twee niveau's inderdaad van T afhangt en dat het verschillend gedrag alleen bepaald wordt door de verschillende ionisatie-energie.

Een analoog resultaat volgt ook uit de half-klassieke theorie van THOMSON. De afhankelijkheid van T is daar iets anders, maar de ionisatie-energie speelt weer de beslissende rol.

Voor kleinere waarden van T is er een vrij groot verschil tusschen de tot nu toe gegeven formules voor de ionisatiekansen en de door absolute meting bepaalde waarden. Voor een deel kan dit aan de metingen liggen, die in dit gebied weinig betrouwbaar zijn, voor een deel zal het ook wel een gevolg zijn van het slecht convergeeren van de theorie van BORN voor kleine electronen-snelheden.

Het zou zeer goed mogelijk zijn, dat desondanks zou blijken, dat inderdaad de ionisatiekansen in hoofdzaak bepaald wordt door de bindings-energie. Dit kan zeer goed door relatieve metingen op de proef gesteld worden. Men behoeft slechts de intensiteiten van lijnen op enkele dicht bij elkaar gelegen niveau's te vergelijken. De drie L-niveau's van wolfram zijn daartoe buitengewoon geschikt. L_I en L_{II} hebben bijna gelijke bindings-energie, maar verschillend azimuthaal-quantumgetal, L_{II} en L_{III} hebben een veel grooter verschil in bindings-energie, maar dezelfde waarde van l. Uit de theorie in de hier aangegeven vorm zou dus volgen, dat de intensiteitsverhouding van lijnen,

¹⁾ H. BETHE Ann. der Phys. 5 325 1930

die L_I en L_{II} als beginniveau hebben, veel minder van de spanning zou afhangen, dan het geval zou zijn met de intensiteitsverhouding van lijnen, die L_{II} en L_{III} tot beginniveau hebben.

In dit geval zou er dus een zeer groot verschil bestaan tusschen de ionisatie door electronenbotsing en de ionisatie door absorptie van straling. Nu kan men in andere gevallen van wisselwerking tusschen atomen en electronen of straling een sterke analogie opmerken. Zoo gelden voor de elastische stoot van electronen en atomen en de cohaerente verstrooiing van straling zeer analoge wetten. Het belangrijkste verschil is eigenlijk, dat een electron wel, maar niet te harde straling niet door de atoomkern verstrooid wordt. Er treden evenwel verschillen op, wanneer energetisch veranderingen optreden. Een electron zal slechts zelden zijn totale energie in een botsingsproces afgeven, terwijl een lichtquant dit bij voorkeur doet. Men kan dus verwachten, dat de analogie bij niet elastische processen minder ver zal gaan dan bij de elastische. Toch kwam het ons waarschijnlijk voor, dat er ook voor de relatieve excitatie van de drie L -niveau's een zekere analogie zou blijven bestaan tusschen de excitatie door straling en die door snelle electronen. De intensiteitsverhouding van lijnen op L_I en L_{II} zou dan meer veranderen bij variatie van de electronensnelheid, dan die van lijnen op L_{II} en L_{III} .